

폴리우레탄 디아크릴레이트의 미세다공성 UV코팅에 의한 PET 직물의 투습방수가공

구광희 · 장진호[†]

금오공과대학교 나노바이오텍스타일공학과

Breathable Waterproof Finish of PET Fabrics via Microporous UV Coating of Polyurethane Diacrylate

Gwang-hoe Koo and Jinho Jang[†]

Department of Nano-Bio Textile Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Kumi 730-701, Korea

(Received: August 17, 2010/Revised: September 13, 2010/Accepted: September 14, 2010)

Abstract— Breathable waterproof PET fabrics were prepared by the UV coating of UV-curable polyurethaneacrylate(PUA) formulation mixed with polyethyleneglycol(PEG) as a water soluble pore former. The dispersed PEG in the UV-cured coating was extracted by warm water, which can generate individual circular pores uniformly distributed all over the coating instead of pore channels. Accordingly the moisture permeability of the microporously coated fabrics increased substantially with increasing PEG addition without significant reduction of hydrostatic pressure. Also the silicone diacrylate addition in the formulation was beneficial in increasing the hydrostatic pressure. The UV-based microporous coating can be an alternative to conventional thermal curing of solventborne polyurethane coating owing to the enhanced environment friendliness and energy saving.

Keywords: PET, poly urethane diacrylate, UV coating, microporous, breathable

1. 서 론

생활수준이 향상됨에 따라 보다 다양한 기능성 직물소재가 요구되어 그 중 하나로 고 내수압과 고 투습성을 동시에 충족하는 투습방수소재가 개발되어 있다. 투습방수 직물(Breathable waterproof fabrics)이란 착용자의 의복이 바람, 비 및 체열 손실에 대해서 인체를 보호하는 의류용 소재이다. 인체 내부의 온도는 37°C이지만 피부 온도는 33에서 35°C 정도로 체온 유지를 위해서는 피부를 통한 기체 상태의 물 배출(발한)이 매우 중요하다. 일반적으로 발한은 인체 활동에 의존하며 도보 상태에서는 약 320g/hr이지만, 등산의 경우 약 1,270g/hr에 달하며, 최대로 일하는 경우 약 1,900g/hr의 땀을 배출한다고 한다¹⁾. 따라서 뛰어난 방수성을 유지하면서도 고도의 투습성을 갖는 투습성 방수소재가 요구되고 있다. 투습방수 직물은 제조방법에 따라 (1) 고밀도 직물, (2) 다공성 멤브레인/코팅,

(3) 친수성 멤브레인/코팅, (4) 다공성과 친수성의 조합 등으로 구분될 수 있다¹⁻³⁾.

고밀도 직물은 흡수성 사나 극세사로 제작하여 10μm 이하의 기공을 갖도록 하여 방수성을 갖도록 하는 것이고, 다공성 멤브레인/코팅의 경우 100nm에서 50μm 미만의 기공 크기를 가질 수 있는 멤브레인을 접착하거나 수지를 코팅하는 것으로 수지용 고분자로는 폴리우레탄, 폴리테트라플루오로에틸렌, 아크릴, 폴리아미노산 등이 사용되나 그 중 폴리우레탄이 가장 많이 사용된다. 미세다공화 방법으로는 멤브레인의 기계적 피브릴화, 습식 응고, 열 응고 코팅, 거품 코팅, 용매 추출 등 다양한 방법이 있다. 친수성 멤브레인/코팅의 경우 다공성을 갖지 않으나 구성성분인 친수성 고분자(예를 들어 폴리에틸렌옥사이드, 폴리아미노산 등)의 무정형 영역이 분자간 기공으로 작용하여 수증기의 흡수 및 점진적인 확산을 통해 투습성을 부여하는 것이다.

[†]Corresponding author. Tel.: +82-54-478-7715; Fax.: +82-54-478-7710; e-mail: jh.jang@kumoh.ac.kr

©2010 The Korean Society of Dyers and Finishers 1229-0033/2010-09/239-245

일반적으로 투습방수가공은 고급품의 경우 내수압이 5,000mmH₂O 이상이고 저급품의 경우에도 1,300mmH₂O 이상을 만족하는 경우 의미가 있으며, 투습성은 적용 용도에 따라 차이는 있지만 고 투습형은 약 6,000g/m²/24hr 이상까지도 요구된다^{1,2)}. 영하의 온도에서 사용되는 보호복 특히, 동계 스포츠용 의류의 경우 의복 내부 수증기가 응축 또는 결빙되어 투습도 및 보온성이 저하하는 문제가 발생할 수 있어 체온 유지 및 쾌적성 유지를 위해 내부의 투습방수포 뿐 아니라 외피의 낮은 열전도도 또한 중요하다^{4,5)}. 투습방수포는 주로 농업/건설 산업 작업자의 보호복을 비롯하여, 스포츠 레저용 의류, 소방복, 군복, 의료용 섬유 등에 사용되어 쾌적감을 향상시킬 뿐 아니라 저온/다습 조건에서의 활동 후 저체온증(Hypothermia) 및 고온다습조건 하 활동에 의한 고체온증(Hyperthermia)도 방지할 수 있다^{6,7)}.

최근 투습방수 가공기술은 전기방사를 이용한 폴리우레탄 나노섬유 웹을 이용한 연구^{8,9)}를 비롯하여 폴리비닐알콜, 소듐 알지네이트 등 수용성 고분자와 폴리우레탄-우레아 수지의 블렌드를 이용한 고투습성 코팅제 제조^{10,11)}, 양친매성 디올 성분을 함유한 수계 폴리우레탄 코팅¹²⁾, 폴리비닐알콜계 투습방수 면직물 코팅¹³⁾ 등 다양한 연구가 진행되었다. 하지만 국내에서는 아직도 유기용제를 이용한 습식 직물코팅이 투습방수가공의 대부분을 차지하고 있으므로 생산과정에서의 작업환경, 화재위험성, 대기오염 뿐 아니라 섬유제품에 잔류하는 유기용제의 인체유해 가능성 등 문제점을 안고 있어 친환경적 투습방수가공 기술개발이 필요한 상황이다. 또한 세계적으로 저탄소 녹색성장에 대한 관심이 증가함에 따라 국내에서도 온실가스 배출 및 환경오염 유발에 대한 규제가 한층 강화되고 있다. 따라서 수용성 폴리우레탄 수지나 열가소성 폴리우레탄을 이용한 핫멜트 라미네이트 등 친환경 투습방수 소재의 개발이 활발히 진행되고 있으며, 본 연구에서는 자외선(UV) 경화형 폴리우레탄 수지의 코팅기술을 이용하여 PET 직물에 대한 미세다공성 투습방수가공을 실현하였다.

2. 실 험

2.1 시료 및 시약

직물은 (주)웅진케미칼에서 제공한 PET 직물(85g/m²)로서 염색, 발수 및 캘린더로 편평화 가

공된 것을 사용하였고 자외선 경화형 폴리우레탄 수지(PUA)는 (주)대원포리머에서 합성 및 공급되었으며 diethylene glycol, ethylene glycol, adipic acid로 구성된 에스테르형 polyol을 1,4-diphenylmethane diisocyanate이나 toluene diisocyanate을 반응시킨 후 말단 이소시아네이트를 2-hydroxyethylacrylate와 반응한 것이다. Polyethylene glycol(Mw 400, Daejung)와 silicone diacrylate(EB350, SK Cytex)은 각각 기공형성용 첨가제와 가교제로 사용하였다. 광개시제인 2-Hydroxy-2-methyl-propiophenone은 Aldrich사에서 구입하였다. 염화칼슘(CaCl₂, Kanto)은 투습도 측정용 흡습제로 사용하였다.

2.2 자외선 경화에 의한 투습방수가공

2.2.1 가공제 부여공정

자외선 경화형 폴리우레탄 수지(PUA)에 PEG 첨가제나 가교제의 농도를 조절한 가공제 조성액을 제조하였고 광개시제는 PUA수지 대비 5%로 고정하였다. 코팅액은 20cm×30cm 크기의 PET 직물에 일정 속도로 나이프 코팅하였고 Polyimide 필름을 격벽으로 사용하여 코팅 두께를 조절하였다. 자외선 조사는 80W/cm의 출력을 가지는 연속식 자외선조사기를 사용하였으며 직물 표면에 3J/cm²의 자외선을 조사하여 경화하였다.

2.2.2 고착율 측정

코팅된 직물의 수세는 40°C의 증류수에 10분간 침지시킨 후 상온의 물에 수 회 수세하였다. 코팅직물의 무게변화를 측정하여 식(1)을 통해 부착율(Add-on, A)과 부착효율(Add-on Efficiency, AE)을 구하였고 이는 각각 직물 대비 부착된 가공제의 비율과 부착량 대비 수세 후 무게 비율이다.

$$A (\%) = \{(W_3 - W_1) / W_1\} \times 100$$

$$AE (\%) = \{(W_3 - W_1) / (W_2 - W_1)\} \times 100 \quad (1)$$

(1) 식에서 W₁은 광경화 전의 시료무게이고 W₂는 광경화후 수세 전의 시료무게이며 W₃는 광경화된 시료의 수세 후 무게이다.

2.3 기능성 평가 및 표면관찰

2.3.1 투습도

투습도는 KS K 0594(CaCl₂법)에 따라 지름 약 7cm의 원형 시험편을 채취하고 코팅면을 흡

습제 방향으로 투습컵에 대하여 동심원이 되도록 하여 패킹과 링을 순차적으로 올려놓고 나비너트로 고정하고 장착측면을 비닐 점착 테이프로 봉합하여 시험체로 한다. 이 시험체를 온도 $40 \pm 2^\circ\text{C}$, $90 \pm 5\%$ RH의 항온항습장치에 넣고 1시간 후에 시험체의 무게(A_1)과 다시 1시간 후의 시험체 무게(A_2)를 측정하고 식(2)을 이용하여 투습도를 계산하였다.

$$\text{투습도}(\text{g/m}^2 \cdot 24\text{h}) = \{10 \times (A_2 - A_1)\} / S \times 24\text{h} \quad (2)$$

위의 식에서 S는 투습 면적으로 약 28.3cm^2 이다.

2.3.2 내수압

시험기는 내수압 측정기를 사용하였고 시험규격은 KS K ISO 811(저수압법)이다. 시험방법은 코팅면을 물과 닿도록 수압 헤드에 파지하고 시험편에 대해 수압을 $60\text{cmH}_2\text{O}/\text{min}$ 속도로 증가시키고 시험편으로부터 3곳에서 물방울이 보이기 시작할 때의 압력을 기록하고 동일조건의 두 개의 시험편에서 측정하여 평균값을 기록하였다.

2.3.3 모폴로지 분석

가공제 처리 조건에 따른 코팅된 직물의 표면 경화상태의 변화를 알아보기 위하여 주사전자현미경(JSM-6380, JEOL)으로 표면 및 단면 이미지를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 UV 코팅된 PET 직물의 적외선분광분석

Fig. 1은 자외선 경화형 폴리우레탄디아크릴레이트(PUA)와 첨가제인 PEG의 KBr 펠렛에 의한 IR 스펙트럼과 UV 코팅된 직물의 ATR 스펙트럼이다. PEG (a)의 경우 2903 , 2876cm^{-1} 에서 CH_2 신축진동, 1460 , 1353cm^{-1} 에서 굽힘진동 피크, 1102cm^{-1} 에서 C-O의 신축진동, $3000 \sim 3600$ 과 1640cm^{-1} 의 OH의 신축 및 굽힘 진동을 통해 PEG임을 알 수 있다. 가공제 PUA(b)는 3341 과 1533cm^{-1} 에서 N-H 신축 및 굽힘 진동, 1725cm^{-1} 에서 C=O 신축진동, $1000 \sim 1220\text{cm}^{-1}$ 사이에서 다양한 C-O 및 C-C 피크를 통해 이차폴리우레탄임을 확인하였다. UV 코팅된 직물 표면의 ATR 스펙트럼인 (c)의 경우 150% PEG

가 함유된 상기 PUA 가공제로 UV코팅하고 수세한 직물이다. PU 가공제와 유사한 피크가 나타나는 것을 통해 PUA 가공제가 코팅되었음을 알 수 있고 1600cm^{-1} 부근 C=C 신축진동 감소와 불용화를 통해 광경화되었음을 확인하였다. 또한 첨가제인 PEG 피크가 나타나지 않음을 통해 PEG가 수세과정에서 제거됨을 확인하였다.

3.2 코팅 두께의 영향

Table 1은 코팅 두께에 따른 부착특성과 투습도(MP) 및 내수압(HP)의 변화를 측정한 것이다. 자외선 경화된 PUA의 코팅두께 증가에 따라 부착율과 고착율이 모두 증가하였지만 투습도 및 내수압의 변화는 상대적으로 미미하였다. 실험실 코팅과 분석의 불균일성을 고려하여도 전체적으로 코팅두께가 증가한 경우 내수압 증가에 대한 기여보다 투습도 감소에 대한 기여가 현저하였다. 이는 무공형 코팅 투습방수 코팅의 일반적인 현상으로 자외선 경화된 가공제의 코팅량 증가가 내수압 증가에는 기여하지만 구성성분인 디올의 친수성이 약해 흡수 및 분자확산 효과가 지배적이지 않기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 2는 PUA 대비 50% PEG가 첨가된 가공제를 코팅한 경우 코팅 두께에 따른 투습도와 내수압 변화이다. PEG가 미첨가된 경우에 비해 내수압이 감소하고 투습도가 현격하게 증가한 것을 알 수 있다. 이는 PUA의 무공형 코팅이 PEG 첨가 및 용출을 통해 미세다공형 코팅으로 전환되어 투습도 향상에 기여한 것으로 보인다.

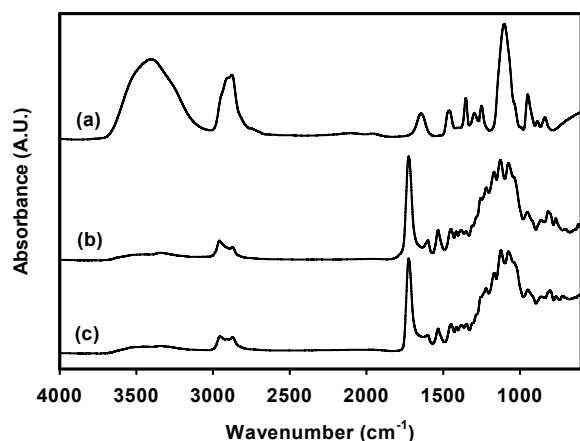


Fig. 1. FT-IR spectra of (a) PEG, (b) PUA resin and (c) UV-coated fabric.

Table 1. Effect of PUA coating thickness on add-on and breathability

Thickness (μm)	A(%)	AE(%)	MP ($\text{g}/\text{m}^2\text{24h}$)	HP (mmH_2O)
30	38.6	63.5	1,300	4,600
50	52.4	62.9	1,200	5,000
80	63.8	63.2	900	4,700
100	81.9	62.7	1,000	4,300

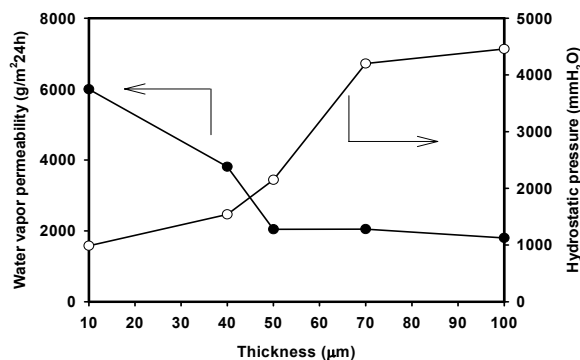


Fig. 2. The effect of coating thickness on the coated PET fabric(50% PEG).

하지만 코팅 두께가 증가함에 따라 내수압이 비례하여 증가하였지만 투습도 감소는 상대적으로 적었다. 따라서 미세다공성 코팅의 두께가 증가하면 무공형 코팅에 비해 투습방수성 부여에 유리하다는 것을 알 수 있다. 50 μm 이하 코팅의 경우 우수한 투습성이 관찰되었지만 내수압이 현저히 낮았는데 이는 부착율이 상대적으로 낮아 코팅의 균일도가 낮기 때문으로 판단된다.

3.3 첨가된 PEG 농도의 영향

다양한 농도의 PEG가 함유된 가공제로 100 μm 로 코팅된 직물의 부착특성과 기능성을 Table 2와 Fig. 3에 나타내었다. PEG 함량이 증가함에 따라 광경화된 코팅 층 내 PEG가 수세에 의해 용출되므로 코팅두께는 일정함에도 불구하고 부착율 및 부착효율이 감소하였다. 또한 PEG가 첨가됨에 따라 코팅막의 내수압은 전체적으로 감소하였지만 투습도가 크게 향상되었는데 이는 미경화된 PEG가 용출됨에 따라 다수의 미세기공을 형성하기 때문이다. 하지만 PUA 대비 30%의 PEG 첨가는 투습도 증가에 크게 기여하지 않았고 오히려 내수압이 증가하였는데 첨가된 PEG의 양이 적어 코팅 내 기공 밀도가

낮았지만 표면에 존재했던 PEG의 용출로 인해 표면 요철이 형성되어 소수성 표면에 의한 내수압 향상에 기여하거나 PEG가 PUA의 중합시 성장 라디칼이 산소에 의해 소멸되는 반응을 감소시키는 것으로 사료된다. PUA 대비 200% PEG가 함유된 것은 균일한 코팅층이 형성되지 않아 투습도는 크게 증가하였지만 내수압 감소가 현저하였다. 본 PUA에 첨가된 PEG의 양은 PUA 중량 대비 약 100%에서 150%가 고 투습도 다공성 UV 코팅에 적절한 것으로 사료된다. 다양한 PEG 농도에 따른 미세다공 코팅구조 형성을 확인하기 위해 전자현미경을 통해 표면 및 단면을 관찰하였다(Fig. 4와 5). PEG가 첨가되지 않은 PUA 코팅의 경우 표면 및 단면 모두 기공이 거의 형성되지 않았지만, PUA내 PEG가 첨가된 경우 경화 후 수세과정에서 용출에 의해 다수의 미세기공을 형성하였고 PEG의 함량이 증가함에 따라 미세기공의 빈도와 직경이 증가하였다.

Table 2. Effect of PEG addition on add-on(thickness, 100 μm)

PEG(%)	A(%)	AE(%)
0	81.9	62.7
10	76.3	61.2
30	72.6	60.3
40	68.1	58.7
50	62.3	57.5
60	60.8	53.1
70	57.5	52.8
100	53.7	52.3
150	52.6	51.4
200	41.8	40.5

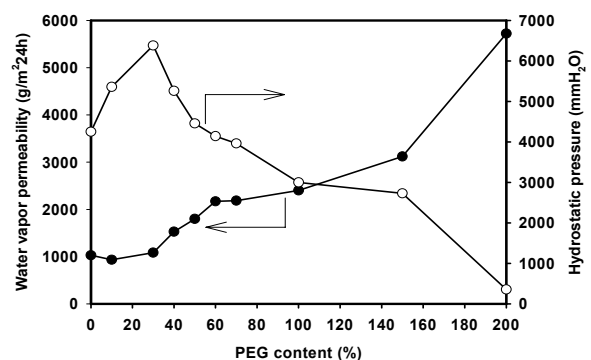


Fig. 3. The effect of PEG content on the coated PET fabric.

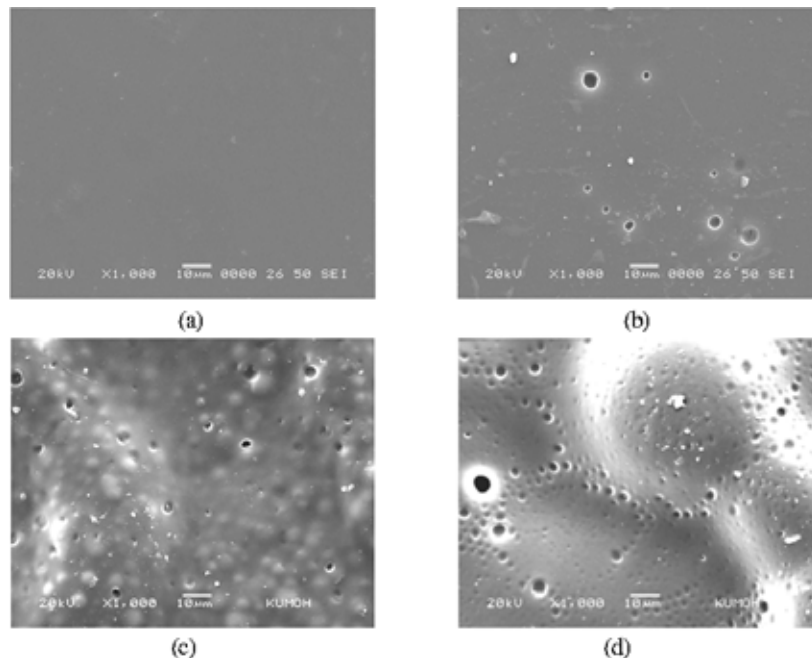


Fig. 4. The surface images of the coated fabrics depending on PEG content: (a) 0%, (b) 50%, (c) 100%, (d) 150%.

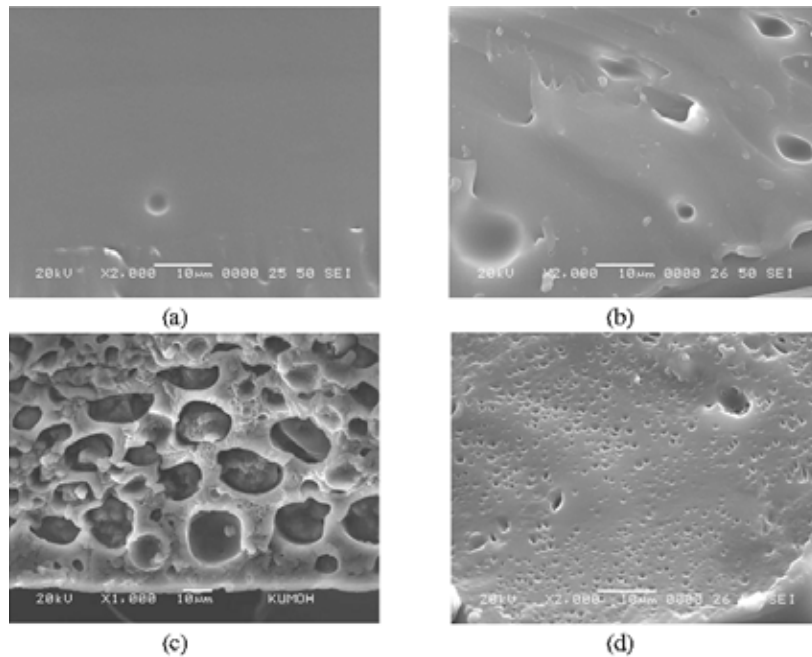


Fig. 5. The cross-sectional image of fabric depending on PEG content: (a) 0%, (b) 50%, (c) 100%, (d) 150%.

대체적으로 기공 직경은 $5\mu\text{m}$ 에서 $10\mu\text{m}$ 이하이었지만 150%의 경우 $1\mu\text{m}$ 이하 기공도 형성되었다. 코팅 표면은 코팅 단면에 비해 기공 형성이 적고 대부분의 기공은 코팅 층 내부에 균일하게 생성되었다. 일반적으로 용제형 폴리우레탄 수지 코팅시 수지불용/용제가용성 용매추출에 의한 다공화는 수지 경화와 기공형성 과정이 동시에 일어나므로 코팅두께 방향으로 긴

채널형 기공이 형성된다. 따라서 일반적인 폴리우레탄 수지의 습식 다공성 코팅의 경우 채널형 다공화에 의한 투습성 증가에 비해 내수압 감소가 현격하므로 상대적으로 고 투습성 부여가 곤란하다. 하지만 본 연구에서 사용된 광경화형 PUA 수지는 채널형이 아닌 개별적인 구형 기공이 형성되었는데 이는 첨가된 PEG가 광경화되지 않고 경화 후 물에 용출되므로 PEG

가 PUA 내에 미세분산된 상태로 기공을 형성하기 때문이다.

따라서 본 연구는 코팅 표면에는 단면에 비해 기공이 적게 존재하며 구형의 미세기공이 전체 단면에 균일하게 분포하여 각 기공이 직접 연결되지 않으므로 다공화에 의한 투습성 증가에도 불구하고 내수압의 감소가 상대적으로 적다는 장점이 있다.

3.4 실리콘 가교제 첨가에 의한 영향

150% PEG가 함유된 가공제에 실리콘 디아크릴레이트 가교제를 첨가한 경우이다(Fig. 6). 가교제 함량이 증가함에 따라 자외선 경화시 가교밀도가 증가함으로써 고착율, 투습도 및 내수압이 모두 증가하였다. 가교밀도의 증가는 내수압을 향상시킬 수 있지만 투습도 향상에는 크게 기여하지 않았다. 첨가된 가교제인 실리콘계 디아크릴레이트가 소수성 물질로 가교형성을 촉진하여 내수압이 향상된 것으로 사료된다.

따라서 코팅액 조성 중 자외선 경화형 가교제 첨가는 가교제의 소수성으로 인해 미세다공성 코팅의 투습도 증가보다는 방수성 향상에 기여하는 것으로 보인다.

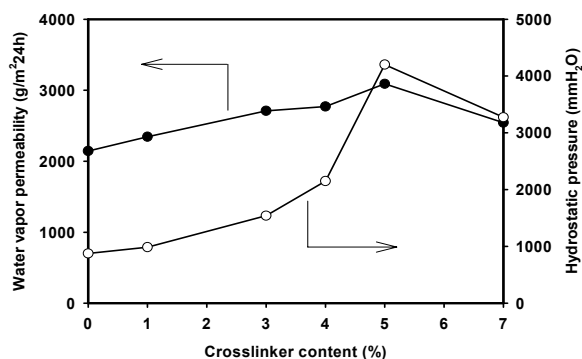


Fig. 6. The effect of crosslinker content on PET fabric (thickness, 50 μ m; PEG, 150%).

4. 결 론

PET 직물에 투습방수성을 부여하기 위해 광경화형 폴리우레탄에 첨가제로 기공형성용 PEG나 실리콘계 가교제를 혼합하고 UV 경화하여 미세다공성 폴리우레탄 코팅을 제조하였다. 적외선 분광분석을 통해 자외선 조사에 의해 경화 및 코팅됨을 확인할 수 있고 첨가된

PEG는 수세에 의해 용출됨을 알 수 있다. 광경화형 폴리우레탄 수지에 PEG를 첨가하고 코팅 후 수세에 의해 수 마이크론 직경을 갖는 미세다공성 코팅을 형성하였는데, 기존 습식 코팅과는 달리 광경화와 용출과정의 분리를 통해 채널형이 아닌 구형 기공을 갖는 다공성 코팅층을 형성할 수 있었다. 또한 코팅 두께 및 PEG 첨가량의 조절을 통해 내수압 감소를 줄이면서 투습도를 향상시킬 수 있었다. 그리고 광경화형 가교제를 첨가한 경우 투습도 저하 없이 내수압을 향상시킬 수 있었다. 따라서 유기용제를 사용하지 않고 우수한 에너지 절감성을 가지는 자외선 경화기술을 이용하여 PEG를 함유한 광경화형 폴리우레탄 수지의 미세다공성 UV 코팅을 통해 친환경적 투습방수 가공기술을 실현하였다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 2007EID11P011000, 2007EID11P043010)

참고문헌

1. D. Heywood, "Textile Finishing", Society of Dyers and Colourists, Bradford, UK, pp.202-206, 2003.
2. A. Mukhopadhyay and V.K. Midha, A Review on Designing the Waterproof Breathable Fabrics Part I: Fundamental Principles and Designing Aspects of Breathable Fabrics, *Journal of Industrial Textiles*, **37**(3), 225-262(2008).
3. A. Mukhopadhyay and V.K. Midha, A Review on Designing the Waterproof Breathable Fabrics Part II: Construction and Suitability of Breathable Fabrics for Different Uses, *Journal of Industrial Textiles*, **38**(1), 17-41(2008).
4. Zhou XH, Wang X, Jiang YX, and Wang SY, Water Vapor Transfer in Multi-layered Textile Assemblies under the Subzero Climatic Condition, *Sen-I Gakkaishi*, **62**(2), 34-38(2006).
5. S. Yoo and E. Kim, Effects of Multilayer Clothing System Array on Water Vapor Transfer and Condensation in Cold Weather Clothing Ensemble,

- Textile Research Journal*, **78**(3), 189-197(2008).
6. Y. P. Guo, Y. Li, H. Tokura, T. Wong, J. Chung, A. S. W. Wong, M. D. I. Gohel, and P. H. M. Leung, Impact of Fabric Moisture Transport Properties on Physiological Responses when Wearing Protective Clothing, *Textile Research Journal*, **78**(12), 1057-1069(2008).
7. P. Gibson, Water-repellent Treatment on Military Uniform Fabrics: Physiological and Comfort Implications, *Journal of Industrial Textiles*, **38**(1), 43-54(2008).
8. Y. K. Kang, C. H. Park, J. Kim, and T. J. Kang, Application of Electrospun Polyurethane Web to Breathable Water-proof Fabrics, *Fibers and Polymers*, **8**(5), 564-570(2007).
9. L. Sumin, D. Kimura, K. H. Lee, J. C. Park, and I. S. Kim, The Effect of Laundering on the Thermal and Water Transfer Properties of Mass-produced Laminated Nanofiber Web for Use in Wear, *Textile Research Journal*, **80**(2), 99-105(2010).
10. J. K. Yun, H. J. Yoo, and H. D. Kim, Preparation and Properties of Waterborne Polyurethane-urea/Poly(vinyl alcohol) Blends for High Water Vapor Permeable Coating Materials, *Macromolecular Research*, **15**(1), 22-30(2007).
11. J. K. Yun, H. J. Yoo, and H. D. Kim, Preparation and Properties of Waterborne Polyurethane-urea/Sodium alginate Blends for High Water Vapor Permeable Coating Materials, *Journal of Applied Polymer Science*, **105**(3), 1168-1176(2007).
12. Q. B. Meng, S. I. Lee, C. Nah, and Y. S. Lee, Preparation of Waterborne Polyurethanes using an Amphiphilic Diol for Breathable Waterproof Textile Coatings, *Progress Organic Coatings*, **66**(4), 382-386(2009).
13. M. Palanikkumaran, A.K. Agrawal, and M. Jassal, Water-proof Breathable Coatings Based on Poly(vinyl alcohol) for Cellulosic Fabric, *Journal of Industrial Textiles*, **38**(2), 151-166(2008).